

Dört Bacaklı Robotlar için Önizleme Kontrolü ve Sıfır Moment Noktası Esaslı Yürüyüş Yörüngesi Üretimi

Tunc Akbas, S. Emre Eskimez, Selim Ozel, Kaan C. Fidan, Beste Bahçeci, O. Kemal Adak, M. Mert Gülhan, Koray Erkekli ve Kemalettin Erbatur

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, 34956 Türkiye (telefon: +90-216-483-9585; fax: +90-216-483-9550; e-mail: tuncakbas@sabanciuniv.edu, eskimez@sabanciuniv.edu, selimozel@sabanciuniv.edu, , kaanfidan@sabanciuniv.edu, bestebahceci@sabanciuniv.edu, omerkemal@sabanciuniv.edu, mertgulhan@sabanciuniv.edu, korayerkekli@sabanciuniv.edu, erbatur@sabanciuniv.edu).

Özetçe —*Robota verilen görevde engel aşımı gerektiğinde bacaklı robotların geri kalan mobil robotlara göre önemli avantajları bulunmaktadır. Bu makalede dört bacaklı robotların düz bir yüzeyde yürüyüşü için bir ölçümleme üretimi yöntemi sunuldu. Bu yaklaşım sıfır moment noktası (SMN) temelli kararlılık ve doğrusal ters sarkaç modeli (DTSM) üzerinedir. Yürüyüş için SMN referans gezinimleri ileri sürülüp oradan önizleme kontrolü vasıtasıyla robotun ağırlık merkezi (RAM) referansı için referans gezinimleri elde edildi. Bacak eklemlerinin pozisyonları RAM referans gezinimleri üzerine ters kinematik uygulanarak hesaplandı. Öne sürülen referans gezege üretimi sentezi, tamamen dinamik 3 boyutlu benzetimle test edildi. Benzetimde 16 serbestlik derecesine (SD) sahip dört bacaklı robot modeli kullanıldı. Benzetim sonuçları, yürüyüş için yapılan referans üretim tekniğinin başarıya ulaştığını gösteriyor.*

Anahtar Kelimeler—*Sıfır moment noktası, dört bacaklı robot, mobil robot, referans üretimi, önizleme kontrolü.*

I. GİRİŞ

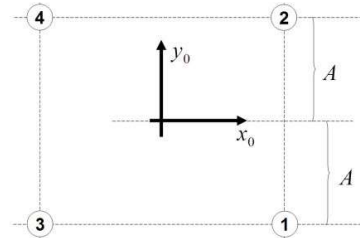
SMN temelli referans gezege üretimi, iki bacaklı robotlar için geniş bir alanda kullanılmaktadır [6-13]. Dört bacaklı robotlar için de bu yöntemin kullanıldığı örnekler görülür [1-5,14-18]. SMN kararlılık kısıtı belirtir ki; robotun kararlılığını korumak için SMN ayakların yere değmesiyle tanımlanan destek poligonu içinde tutulmalıdır. SMN denklemlerinin serbestlik derecesi yüksek olan robotlarda elde edilmesi kolaydır fakat bu denklemler pozisyon, hız ve ivme değişkenlerini de kapsadığından ötürü bu denklemleri referans gezinimleriyle sentezleyip kullanmak zordur. Bu sebeple birçok araştırmacı serbestlik derecesi yüksek olanlar yerine daha sadeleştirilmiş modelleri kullanır. DTSM de bu şekilde sadeleştirilmiş modellerden biridir. Referans sentezindeki ilk adım istenilen yürüyüş biçimini için ayağın iniş pozisyonunun atanmasıdır. Ayağın iniş pozisyonuyla tutarlı SMN referansı daha sonra üretilir. Sonrasında ZAM için referans gezinimi, SMN referans gezinimi ve DTSM kullanılarak hesaplanır. Ayakların iniş pozisyonları ve RAM arasında ters kinematik problemi çözülerek robotun eklem pozisyonu referansları hesaplanır. Bu referanslar birbirleriyle bağımsız PID eklem kontrolörleri kullanılarak takip edilir. PID eklem kontrolörlerine ek olarak eylemsizlik sensörlerinden ve dize yerleştirilmiş güç ve tork sensörlerinden alınan geri beslemeyle çevrimiçi referans modifikasyonları birçok çalışma da yapılır.

ZAM referanslarını SMN referanslarını kullanarak hesaplayabilmek için çeşitli metodlar vardır. Önizleme kontrolü [10, 19] bu metodlar arasındadır. İki bacaklı robotlar

üstünde kullanılan SMN'nın önizleme kontrolü [5] de açıklanmıştır. SMN referanslarına çevrimiçi müdahaleye izin verdiği için referans üretimi temelli önizleme kontrolü yaygın olarak kabul edilmiş bir metottur. Fakat önizleme kontrolü, iki baktan fazla bacaklı robotların gezege sentezi için yaygın kullanılan bir yöntem değildir. Nadir görülen örneklerden biri altı bacaklı bir robot olan ve önizleme kontrolünü RAM referansı gezinimini hesaplamak için kullanan Asterisk'tir [17].

Bu makalede [18] SMN kısıtı ve önizleme kontrolü, dört bacaklı bir robotun çapraz bacak desteği esnasında kullanılmıştır fakat hareket üretimi işlemi açıkça tanımlanmamıştır. Bu makale [18] den, SMN geziniminin önizleme kontrolü ve yürüyüş şekli üretim tekniği arasında bağlantı kurmak için özgün bir yöntem önermesi sebebiyle farklılık gösterir. Bu yöntem farklı hareket biçimlerine de uygulanabilir [20].

Bu makaledeki yazarların bu konu üzerindeki daha önceki çalışmalarından birinde SMN kararlılık kısıtı ve dört bacaklı robotlar için DTSM ile birlikte önizleme kontrolünden bahsedilmiştir [20]. Bu makale [20]de elde edilen sonuçları yürüyüş referansı üretimiyle iletmiştir. Bu yüzden [20] de sunulan önizleme kontrolü tekniği, bu makalede çeşitli hareket türleri için genellendi. Önerilen referans sentezi ve kontrol yapısı tamamen dinamik 3 boyutlu benzetim kullanılarak 16 serbestlik dereceli dört bacaklı robot üzerine uygulandı.



Şekil 1. Hareket başlamadan önce robotun ayak pozisyonları. Daireler ayakların numaralarını temsil eder: (1) sağ ön, (2) sol ön, (3) sağ arka, (4) sol arka. x_0 , y_0 dünya koordinat düzlemini tanımlayan değişkenlerdir

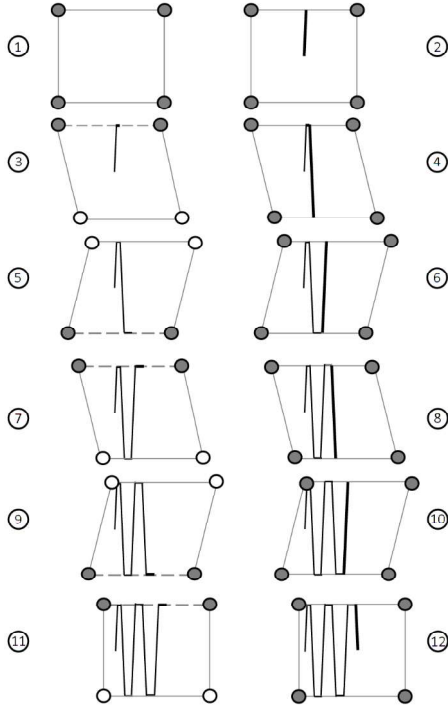
II. YÜRÜYÜŞ İÇİN SMN GEZİNİGE REFERANSI

Bu makale boyunca dünya koordinat düzleminin x eksenini, dört bacaklı robotun yürüyüş yönü, y eksenini yürüyüş yönüne dik ve z eksenini zemine dik olarak tanımlanmıştır. Başka bir koordinat sistemi robotun üstünde tanımlandı ve bu koordinat sistemi z eksenini hariç dünya koordinat sistemiyle aynı eksen

hizalamasına sahip ve z eksenini ötelenmiş durumda. Dünya koordinat düzleminin x ve y eksenleri şekil 1’de gösterilmiştir.

Hareket esnasında robotun bacak çiftleri aynı anda salınıyor. Bu çiftler şekil 1’de görüldüğü şekilde 1-3 ve 2-4’tür. Her bacak çifti salınırken yerdeki bacak çifti arasında destek doğru parçası oluşur. SMN gezege referansı bu doğru parçası üzerinde oluşturulmalıdır ki kararlı harekete ulaşılabilir. Ayrıca literatürde görüldüğü üzere SMN kriterinde genelde destek doğru parçasından değil destek poligonundan bahsedilir. Fakat gerçek hayattaki uygulamalarda iyi ayak arasındaki mükemmel doğru parçası yerine, ince bir şerit robotu destekler.

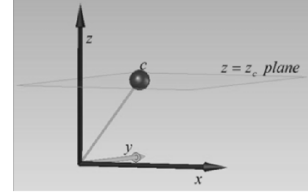
SMN gezege referansını elde edebilmek için ayakların yerleşim konumları ve zamanları saptanmak zorundadır. Şekil 2’de SMN gezege referansının 5 aşaması için ayak yerleşim konumlarının yapısı gösterilmiştir. Yürüyüş gerekliliklerinin tam destek süresince sıfır olmadığı söylenmelidir. Bu ayak çiftleri arasında oluşan destek doğru parçalarının birbirlerini kesmemelerinden ötürü ortaya çıkar. SMN bu destek doğru parçaları üzerinde hareket etmelidir ve bu hareket için dörtlü destek safhası tahsis edilmelidir ki SMN gezinmesi kesintisiz olsun.



Şekil 2. SMN referansının 5 adımlık yürüyüş için yapısı. Daire içindeki numaralar hareket evrelerini temsil eder. Koyu renkli daireler destek bacağı gösterir. Kalın çizgiler içinde bulunan destek periyodunda SMN referansını gösterir. Kesik çizgiler destek bacakları arasındaki doğru parçasıdır. Dikdörtgen ve elmas şekilli şekiller 4lü destek durumunda destek poligonunu gösterir.

Şekil 1’deki 1. fazda dört bacaklı robot dikdörtgen bir desten poligonu üzerinde ayakta durmaktadır. 2. Fazın başında SMN gezinmesi 4 ve 2 numaralı ayakta geçen doğruya doğru hareket eder. SMN’nin hareketi bu doğruya ulaştığı zaman sonlanır. Bu konumla bir sonraki salınım fazı (faz 3) için hazırlıktır. Aynı zamanda 2. Fazda SMN gezinmesi ileri doğru (x eksenini yönünde) de hareket eder. 3. Fazda robot 2 ve 4 numaralı ayaklar tarafından desteklenir. SMN x eksenini doğrultusunda ileri doğru 2 ve 4 numaralı ayakları birleştiren doğru üzerinde hareket eder. 3 numaralı faz salınan bacakların verile temasıyla tamamlanır. 4 numaralı evre de SMN 3 ve 1

numaralı ayakların arasındaki doğruya doğru ileri doğru hareket etmeye başlar. Bu faz da SMN doğruya ulaştığında sona erer. 4. Fazdan sonra dört bacaklı robotun geri kalan SMN gezinmesi 11. Faz (son çift destek fazına) kadar periyodik olarak devam eder. Şekildeki çift numaralı fazlar dörtlü destek fazlarıdır. Aynı şekilde tek numaralı evreler de çift destek evreleridir. 11. Fazda salınan bacaklar adım mesafesinin yarısını katederek x eksenini doğrultusundaki destek bacaklarıyla aynı hıza gelirler. Bu son fazla SMN gezinmesi destek poligonunun ortasına gelir ve hareket sonlanır.



Şekil 3. Doğrusal Ters Sarkaç Modeli

III. ÖNİZLEME KONTROLÜ KULLANILARAK RAM HESAPLANMASI

DTSM, ayaklı robotların referans üretimi için kolayca kullanılabilen sade bir modeldir. Robotun gövdesi, RAM da bulunan bir nokta kütle olarak yaklaşılanır. Bu nokta yerdeki kaymayan bir noktaya ağırlıksız bir kol ile bağlıdır. Nokta ağırlık ve RAM çakıştığı için bu ağırlıksız kol, destek bacağı için ideal bir modeldir. DTSM şekil 3’de resimlendirilmiştir. Şekildeki $c = (c_x \ c_y \ c_z)^T$ nokta ağırlığın koordinatları olup, c_z sabit bir sayıdır. Bu varsayıma dayanarak, x ve y yönlerindeki RAM ve SMN arasındaki ilişki ayrılmış hale geliyor [10].

$$p_x = c_x - (z_c/g)\ddot{c}_x \quad (1)$$

$$p_y = c_y - (z_c/g)\ddot{c}_y \quad (2)$$

(1) ve (2) numaralı denklemlerde, g yerçekimi katsayısı, z_c nokta ağırlığın hareketli olduğu düzlemin yüksekliği, p_x ve p_y de SMN koordinatlarıdır.

SMN gezege referansından RAM hesaplanması önemli bir problemdir. [10] bu problem önizleme kontrolü kullanarak bir çözüm önermiştir. Bu öneri aşağıdaki sistem tanımını kullanır.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_x \quad (3)$$

$$p_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -z_c/g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

Sistemin kontrol girdisi u_x RAM ivmesinin zamana göre birinci dereceden türevidir. Sistemin çıktısı ise x eksenindeki SMN referans pozisyonudur. 2. Bölümde hesaplandığı gibi SMN gezege referansları, kontrol girdisi tarafından takip edilir. Sonuç olarak sistem RAM gezege referanslarını durum değişkenleri olarak hesaplar bunlar da sistemi SMN gezege referansını takip etmek zorunda bırakır. (3) ve (4) numaralı denklemlerin sisteme önizleme kontrolü uygulanabilmesi için ayrı zamanlıya çevrilmesi gerekir:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad p_k = Cx_k \quad (5)$$

$$x_k = \begin{bmatrix} c_x(kT) & \dot{c}_x(kT) & \ddot{c}_x(kT) \end{bmatrix}^T \quad u_k = u_x(kT) \quad (6)$$

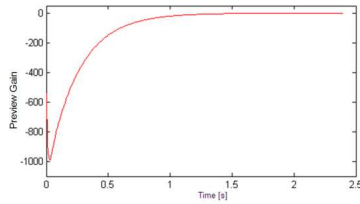
$$p_k = p_x(kT)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} B = [T^3/6 \quad T^2/2 \quad T]^T C = [1 \quad 0 \quad -z_c/g] \quad (7)$$

k aralık zaman dizini ve T örnekleme periyodudur. Denklem (5) ve (7)'deki sistem tanımı, y eksenindeki hareket için de tanımlanmıştır. Bu yüzden durum değişkeni ve sistem çıktısı sırasıyla $x_k = [c_y(kT) \quad \dot{c}_y(kT) \quad \ddot{c}_y(kT)]^T$ ve $p_k = p_y(kT)$ olarak değiştirilebilir. x ve y kordinatları için hesaplamalar ayrı ayrı yapılır. Önizleme kontrolü, N_L döngülerindeki referans değerlerine zaman içinde direk bakması ve performans dizinini o period üzerinde minimize edecek optimal bir kontrol girdisi hesaplamasıyla klasik kontrol yöntemlerinden farklılık gösterir. Rosenthal ve Tomizuka aralık zamanlı sistemlerde optimal kontrol girdisi hesaplamak için bit yöntem geliştirdiler [29]. Bu metod Katayama tarafından tamamlandı [30]. Sistemi kontrol eden u_k fonksiyonunun optimizasyonunu hesaplayan performans dizini aşağıdadır:

$$J = \sum_{i=k}^{\infty} \{Q_e e(i)^2 + \Delta x^T(i) Q_x \Delta x(i) + R \Delta u^2(i)\} \quad (8)$$

Kontrol girdisinin hesaplanması ve performans dizininin (8) deayları ayrıntılı bir şekilde [30] da açıklanmıştır. Denklem (8) in içindeki $e(i) = p_i - p_i^{ref}$ sistem çıktısı ve referans arasındaki takip hatasıdır. $\Delta x_k = x_k - x_{k-1}$ durum değişkenlerindeki değişimleri gösteren bir vektördür, $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ ise girdideki değişimleri gösteren bir vektördür.



Şekil 4. Önizleme kontrolü kazancı $G_p(j)$ (2.5 saniye için) ($T = 0.01$ s, $z_c = 0.614$ m, $Q_e = 1$, $Q_x = 0$, $R = 10^{-6}$)

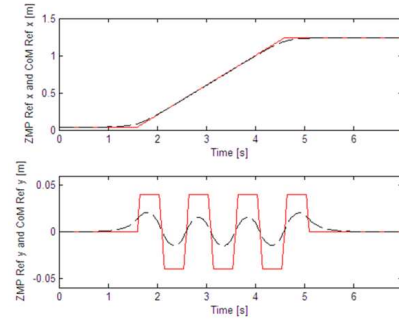
Q_e ve R sıfırdan büyük skaler değişkenlerdir (çoklu girdi çıktı sistemlerde bu değişkenler matrisler haline gelirler). Q_x ise 3×3 simetrik sıfırdan büyük tamamlı bir matrisdir. N_L döngülerine her örnekleme zamanında bakan önizleme kontrolü için (8) deki performans dizinini minimize eden optimal girdi [10, 22] da verilmiştir.

$$u_k = -G_i \sum_{i=0}^k e(k) - G_x x(k) - \sum_{j=1}^{N_L} G_p(j) p^{ref}(k+j). \quad (9)$$

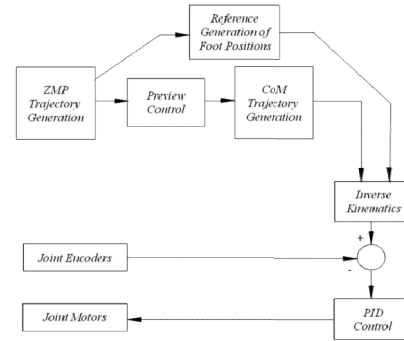
Bu eşitlikteki (9) ilk terim takip hatasının integre edilmiş halidir, ikinci terim ise durum geribeslemesidir. Üçüncü terim önizleme kontrolü terimidir ve daha fazla açıklama yapmak gerekir. Bu girdi, güncel kontrol döngüsünün önündeki j döngüleri olan referans değerlerini kullanarak bu değerleri zamanla değişen kazanım fonksiyonuyla birlikte integre eder ve sonuçları genel kontrolöre ekler. j değerlerinin güncel döngüye yakın olmasının daha fazla önemli olduğu şekil 4'de görülebilir. Bu gözlem gösterir ki gelecekteki döngülerdeki olaylar güncel döngüye yeterince yakın oldukça hesaba katılmış olur.

Denklem (9)da görüldüğü üzere, G_i , G_x ve $G_p(j)$; Q_e , Q_x , R ve denklem (5)deki sistem parametreleri kullanılarak hesaplanmış kazanımlardır. Şekil 4'deki şekilde kontrol kazanımı $G_p(j)$ 1.6 saniye sonra sıfıra yakınsar. Bu yüzden N_L parametresini $1.6/T$ olarak seçmek mantıklıdır [10]. Bu işlem sırasında RAM gezinmesi, sistem durum vektöründeki değerler kullanılarak elde edilir.

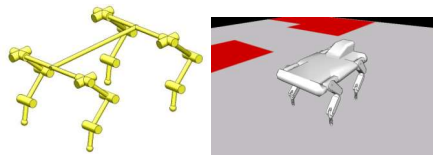
Yürüyüş için SMN gezege referansı ve buna bağlı RAM referansı şekil 5'de gösterildiği şekilde önizleme kontrolü kullanılarak hesaplanır



Şekil 5. 7 adımlık yürüyüş için SMN ve RAM gezinmelerinin referansları.



Şekil 6. Kontrol blok diyagramı.



Şekil 7. Kinematik düzenleme ve animasyon ortamı.

IV. BENZETİM SONUÇLARI

Bu makalede kullanılan dört bacaklı robot modeli her bacağına 4 serbestlik derecesine sahiptir. İki serbestlik derecesi kalça ekleminde bulunur. Diz ve bilek eklemleri birer serbestlik derecesine sahiptir. Robotun kinematik düzenlemesi şekil 7'de gösterilmiştir. Aynı şekil üzerinde animasyon ortamı da gösterilmiştir. Bağlantı uzunlukları ve eklemler boyutları tablo 1 de gösterilmiştir. Benzetimler 3. Ve 3. Kısımda bahsedilen yöntemler kullanılarak hesaplanmış referans gezinmeleri kullanılarak yapılmıştır. Eklemler pozisyonlarının referansları, RAM ve kartezyen ayak pozisyon referansları arasındaki ters kinematik problemi çözülerek bulunmuştur. Bu pozisyon referansları bağlantısız PID eklemler kontrolörleri kullanılarak takip edilmiştir. Şekil 6'da benzetimde kullanılan kontrolörlerin blok diyagramı verilmiştir. Benzetimde zeminle kontağı tanımlamak için

adaptif penaltı temelli algoritma kullanılmıştır. [23]de bu algoritmanın detayları açıklanmıştır.

TABLO 1. BENZETİM MODEL DEĞİŞKENLERİ

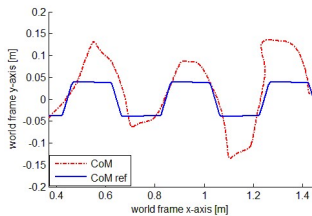
Eklem	Boyutlar(LxWxH) [m]	Kütle[kg]
Gövde	1.2x0.6x0.15	50
Üst bacak	0.28x0.05x0.1	4.8
Alt bacak	0.27x0.05x0.1	3.85
Bilek	0.22x0.05x0.5	3.85

TABLO 2. HAREKET DEĞİŞKENLERİ

Sembol	Tanım	Değer
T_s	Adım süresi	0.5 s
A	Ayağın y koordinati	0.20 m
$2B$	Adım uzunluğu	0.20 m
h_c	Adım yüksekliği	0.05m

Ayak gezinmeleri, hareket referanslarını tamamlamak için dünya koordinat düzleminde tanımlanır. Temel olarak yumuşak bir hareket sağlamak için ayağın x ve z eksenindeki referansları için sinüs biçimli fonksiyonlar kullanılır. y eksenindeki ayak referansları ise sabit sayılardır (sağ taraf için A' 'da).

Referansı üretimi için kullanılan değişkenler Tablo 2 de verilmiştir. Benzetim sonuçlarına bir örnek olarak şekil 8'de yürüyüş periyodunun bir kısmı görülebilir, bu kısımda dört bacaklı robotun dünya koordinat sistemine göre RAM gezinge referansı ve gerçek RAM gezinmesi görülür. DTSM sadeleştirilmiş bir model olduğu için kesin bir referans takibi beklenen bir sonuç değildir. RAM gezinge referansı ve gerçek RAM gezinmesi arasındaki farklılık sürekli bir yürüyüşü sağlaması açısından, kararlı bir yürüyüş için kabul edilebilecek düzeyde görmekteyiz. Aynı zamanda şekil 9 gösterir ki robot gövdesinin tonu ve yunuslama açıları, başarılı ve kararlı bir yürüyüşün başarıldığını gösterir. Yürüyüşün sürekliliği bir performans göstergesi olarak görülmektedir. Performansın niceliğini belirlemek için düz bir doğrultudan birim ilerlemede ne kadar sapıldığı, robotun yuvarlanma eksenin çevresinde ne kadar döndüğü gibi faktörler kullanılabilir. Ancak literatürde bu gibi verilerin kullanımı yaygın değildir. Alternatif referans sentezi yöntemleri ağırlık merkezinin destek poligonun ile ilişkisine ya da merkezi ötürü üretici sistemlerine dayanmaktadır. Ağırlık merkezi yaklaşımları daha yavaş yörüngeleri beraberinde getirmektedir. Merkezi ötürü sistemi uygun bir alternatiftir, ancak doğrudan bir denge ölçütünü içermemektedir. Bir denge ölçütüne dayanan yöntemimizin başarı vadettiği görüşündeyiz

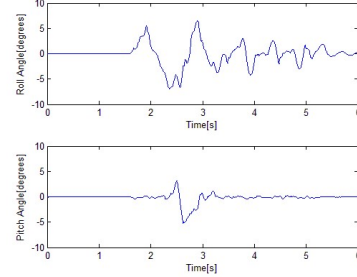


Şekil 8. RAM gezinge referansı ve gerçek RAM gezinmesi (dünya koordinat sistemine göre).

V. SONUÇ

Bu makalede dört ayaklı bir robotun yürüyüşü için kararlı SMN gezinge referansı üretilmiştir. SMN ve RAM arasındaki ilişki DTSM kullanılarak modellenmiştir. Önizleme kontrolü RAM gezinge referansını yaratmak için kullanılmıştır. RAM ve ayak pozisyonları arasındaki ters kinematik problemi çözülerek, eklem referansları bulunmuştur. Robotun hareket

benzetimleri önerilen SMN temelli gezinge referansı üretimi tekniği kullanılarak yapılmıştır. Benzetimde kullanılan robotun adım uzunluğu 16 cmdir ve yürüyüş ve tırıs gitme hareket şekillerinde başarıyla hareket etmiştir. Benzetim sonuçları bu deneyde önerilen referans üretimi yaklaşımını motive edecek şekildedir. İlerki çalışmalar için önizleme kontrolü temelli referans üretimi yöntemi hareket geçişleri için kullanılacaktır.



Şekil 9. 7 adım için tonu ve yunuslama açıları. Bu şekil, şekil 5deki gezinge referanslarının karşılığıdır.

VI. TEŞEKKÜRLER

Bu araştırma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir. (Araştırma proje numarası: 114E618).

KAYNAKÇA

- [1] K. Yoneda, H. Iiyama ve S. Hirose, "Intermittent Trot Gait of a Quadruped Walking Machine Dynamic Stability Control of an Omnidirectional Walk," In Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, pp: 3002-3007, 1996.
- [2] K. Yoneda and S. Hirose, "Dynamic and static fusion gait of a quadruped walking vehicle on a winding path," Advanced Robotics, pp: 125-136, 1994.
- [3] R. Kurazume, K. Yoneda and S. Hirose, "Feedforward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle," Autonomous Robots, Vol: 12, No: 2, pp: 157-172, 2002.
- [4] H. Takeuchi, "Real Time Optimization for Robot Control using Receding Horizon Control with Equal Constraint," Journal of Robotics Systems, Vol: 20, pp: 3-13, 2003.
- [5] H. Osumi, S. Kamiya, H. Kato, K. Umeda, R. Ueda and T. Arai, "Time optimal control for quadruped walking robots," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp: 1102-1108, 2006.
- [6] K. Erbatır and O. Kurt, "Natural ZMP trajectories for Biped Robot Reference Generation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol: 56, No: 3, 2009.
- [7] K. Soraio, T. Murakami and K. Ohnishi, "A Unified Approach to ZMP and Gravity Center Control in Biped Dynamic Stable Walking," Proceedings of IEEE ASME Int. Conf. Adv. Intelligent Mechanisms, CD-Rom, 1987.
- [8] J.H. Park, and Y.K. Rhee, "ZMP Trajectory Generation for Reduced Trunk Motions of Biped Robots," Proc. IEEE IRSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, IROS '98 pp: 90-95, 1998.
- [9] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, and D. Stokic, Biped Locomotion: Dynamics, Stability and Application. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990.
- [10] S. Kajita, F. Kahehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa, "Biped Walking Pattern Generation using Preview Control of the Zero-Moment-Point," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol: 2, pp: 1620-1626, 2003.
- [11] E. Taskiran, M. Yilmaz, O. Koca, U. Seven and K. Erbatır, "Trajectory Generation with Natural ZMP References for the Biped Walking Robot SURALP," IEEE International Conference on Robotics and Aut. pp: 4237-4242, 2010.
- [12] J. Y. Kim, I. W. Park, J. H. Oh, "Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor," J. Intell. Robot Syst. (2007) 48:457-484, January 2007.
- [13] K. Erbatır, U. Seven, E. Taskiran, Ö. Koca, M. Yilmaz, G. Kızıltas, M. Ünel, A. Sabanovic, A. Onat, "SURALP: A New Full-Body Humanoid Robot Platform," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009, St. Louis, MO, USA, Ekim 2009.
- [14] H. Takeuchi, "Development of MEL HORSE," IEEE International Conference on Robotics and Automation pp: 3165-3170, 2001.
- [15] W. Pengfei, H. Bo and S. Lining, "Walking research on multi-motion mode quadruped bionic robot based on moving ZMP," IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Vol: 4, pp: 1935-1940, 2005.
- [16] M. Kalakrishnan, J. Buchli, P. Pastor, M. Mistry and S. Schaal, "Fast, robust quadruped locomotion over challenging terrain," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp: 2665-2670, 2010.
- [17] C. Theeravithayangkura, T. Takubo, K. Ohara, Y. Mae and T. Arai, "Dynamic Rolling-walk Motion by Limb Mechanism Robot ASTERISK," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp: 2659-2664, 2009.
- [18] K. Byl, A. Shkolnik, S. Prentice, N. Roy and R. Tedrak, "Reliable Dynamic Motions for a Stiff Quadruped," Springer Tracks in Advanced Robotics, Vol: 54, pp: 319-328, 2009.
- [19] B. Verrelst, O. Stasse, K. Yokoi, B. Vanderborght, "Dynamically Stepping Over Obstacles by the Humanoid Robot HRP-2," Proc. IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, Genova-Italy, Aralık 2006.
- [20] K. C. Fidan, T. Akbaş, Ş. E. Eskimez, S. Özel, Ö. K. Adak, Ö. Drama, M. Konukoglu, G. Yilmaz, K. Erbatır, "Dört Bacaklı Robotlar için Önizlemeli Kontrol ile Sıfır Moment Noktası Tabanlı Yürüme Yörüngesi Sentezi-ZMP Based Locomotion Trajectory Synthesis for Quadruped Robots with Preview Control," Turkish Automatic Control Conference, September 2011, İzmir, Turkey, (In Turkish).
- [21] M. Tomizuka, Rosenthal, D.E., "On the Optimal Digital State Vector Feedback Controller with Integral and Preview Actions," Trans. of the ASME, J. of Dyn. Sys. Meas. Contr., 101, pp: 172-178, 1979.
- [22] T. Katayama, Ohki, T., Inoue, T. and Kato, T., "Design of an Optimal Controller for a Discrete Time System Subject to Previewable Demand," Int. J. Control, Vol: 41, No: 3, pp: 677-699, 1985.
- [23] K. Erbatır, A. Kawamura, "A New Penalty Based Contact Modeling and Dynamics Simulation Method as Applied to Biped Walking Robots," CD Proc. FIRA World Congress 2003, Vienna, Austria.